MATLAB AND PSPICE FOR TEACHING RC OSCILLATORS WITH OPERATIONAL AMPLIFIERS

Ekaterina Dimitrova, Technical University of Varna, edimitrowa55@gmail.com

Abstract: The article is devoted to the use of *PSpice* and *Matlab* in the study of operational amplifiers circuits with selective frequency characteristics in the case of sinusoidal oscillators. A conceptual emphasis on an approach to analysis of RC circuits, based on the Barkhausen criteria for oscillation, is made. The subcircuit nodal analysis of analog electronic circuits is applied for amplitude and phase conditions deriving. Simulation in Matlab and *PSpice* are presented, which confirm the theoretical results for a particular scheme. *PSpice* simulations are carried out for adjusting the amplitude stabilization of the oscillations. A solved project example is presented, combining conceptual and computational work, for better training of students and raising understanding of frequency dependent analog circuits.

Keywords: Active learning, Analog Electronic Circuits, Analysis of Electronic Circuits, Operational Amplifiers, RC Oscillators, Matlab, PSpice.

MATLAB И PSPICE В ИЗУЧАВАНЕТО НА RC ГЕНЕРАТОРНИ СХЕМИ С ОПЕРАЦИОННИ УСИЛВАТЕЛИ

Екатерина Димитрова, Технически Университет – Варна, edimitrowa55@gmail.com

Абстракт: Статията е посветена на приложението на *PSpice* и *Matlab* в изучаването на схеми със селективни честотни характеристики с операционни усилватели в случая на синусоидални генератори. Направен е концептуален акцент върху подхода за анализ на RC генераторни схеми базиран на критерия на Barkhausen с приложение на обобщения метод на възловите потенциали на аналогови електронни схеми. Представени са симулационни изследвания с *Matlab* и *PSpice*, които потвърждават теоретичните резултати за конкретна схема. Извършена е симулационна настройка за стабилизацията на амплитудата на генератора. Показан е пример за съчетание на концептуалната и изчислителната работа с цел по-добро обучение на студентите и повишаване разбирането на честотнозависимите схеми.

Ключови думи: активно обучение, аналогови електронни схеми, анализ на електронни схеми, операционни усилватели, RC генератори, Matlab, Pspice.

Въведение

Изследването и проектирането в електрониката с помоща на компютър е актуален и ефективен подход. Той се използва все повече и в обучението, при реализацията на различните форми на активното обучение, в това число и при ориентираното към изпълнение от студентите на проекти, свързани с обучението им, по основните теми на Анализа на електронните схеми в Аналоговата схемотехника [1], [2], [3]. Концептуалното разбиране на анализа на схемите е задължително и то неотменно предхожда, или най-малкото върви в паралел с изучаването и използването на числени програмни симулатори, какъвто е без съмнение симулаторът *PSpice* [4], [5]. Той е

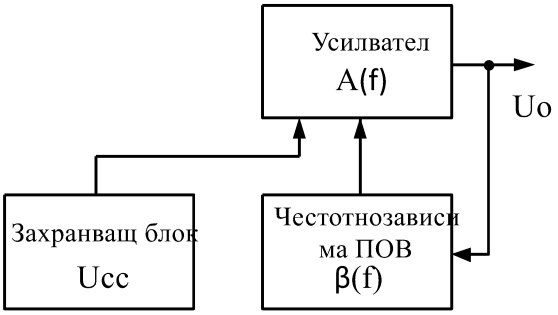
версия за персонален компютър на програмата *Spice* (Simulation Program with Integrated Circuits Emphases) и се приема за световен стандарт в изследването на както на аналогови, така и на цифрови схеми. В осмислянето на анализа и изпълнението на изчисления на база на създадено от студентите описание на схемите, програмата Matlab предлага големи възможности [6]. И двете програмни системи се изучават от студентите по Електроника в основните български технически университети, в унисон с аналогичните университети в света.

Статията е посветена на приложението на *PSpice* и *Matlab* в изучаването на схеми със селективни честотни характеристики с операционни усилватели в случая на синусоидални генератори.

Направен е концептуален акцент върху подхода за анализ на RC генераторни схеми, базиран на критерия на Баркхосен (Barkhausen) с приложение на обобщения метод на възловите потенциали на аналогови електронни схеми. Изведени са амплитудното и фазовото условие за генерации за схемата на RC генератор с мост на Вин. Създаден е скрипт за *Matlab* и са получени амплитудно-честотните харакеристики на генераторната схема, на база на теоретично получените преди това характеристики. Представени са симулационни изследвания с *PSpice*, които потвърждават теоретичните резултати. Извършена е настройка за стабилизация на амплитудата на генератора. Така практически е постигнато съчетание на концептуалната и изчислителната работа и е решен конкретен пример с цел по-добро обучение и разбиране на честотнозависими схеми от студентите.

1. Концептуален акцент върху RC генераторите с операционни усливатели.

RC генераторите са схеми, които създават периодични сигнали, като конвертират постояннотоковото захранване в променливотоков сигнал без да има необходимост от входен променливотоков сигнал. Използват се различни подходи за проектирането им. Един от основните подходи е да се използва честотно зависима обратна връзка към усилвателна схема за постъпване към входа на усилвателя на част от изходния му сигнал. В блоков вид най-общо схемата на линеен генератор има вида на фиг.1. При определени условия този сигнал има такава амплитуда и фаза, че възниква устойчива генерация на синусоидален сигнал.



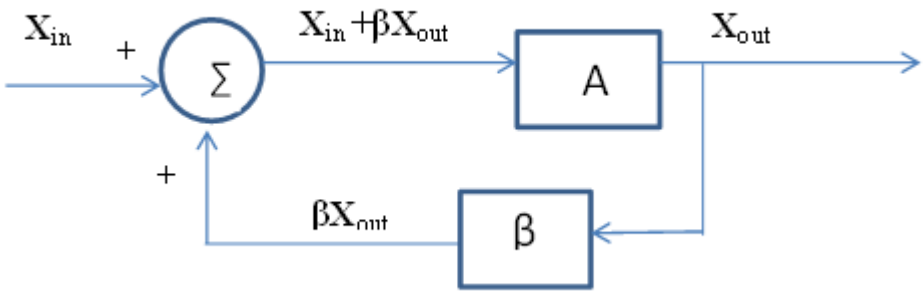
Фиг.1. Блокова схема на генератор

A(f)–честотнозависим коефициент на усилване на усилвателя;

B(f)- комплексна предавателна честотнозависима функция на схемата на обратната връзка. В конкретен случай тя се състои от RC елементи.

1.1.Критерий на Баркхосен (Barkhausen)

Условията за генерации се извеждат на база на схемата на фиг.2. Допуска се въздействие на входно възбуждане Xin, но тъй като целта е схемата да има стабилен изходен сигнал, когато отсъства входен сигнал, то се търси отговор на въпроса какви са условията, при които изходният сигнал Xout не е нула въпреки, че Xin е нула.



Фиг. 2. Схема за определяне на условията за генерации

Съгласно означенията на фиг.2 са в сила изразите по-долу:

$$X_{out} = A(f)[X_{in} + \beta(f)X_{out}] \quad (1)$$

$$X_{out} = \frac{A(f)}{1 - A(f)\beta(f)} X_{in} \quad (2)$$

Съгласно израза (2), при 1-A(f)β(f)=0 коефициентът на усилване става много голям и малка флуктоация на входа на усилвателя води до самовъзбуждане при Xin равно на нула. Изразът (3) представлява критерият на Баркхосен за възникване на генерации [7].

$$A(f).\beta(f)=1 \quad (3)$$

Тъй като A и β са комплексни величини, то от него се получават две условия: първо фазовочестотната характеристика на *A(f)β(f)* е нула или кратна на 2π за честотата на генерации и второ амплитудночестотната характеристика при честотата на генерации трябва да е единица , а на практика малко по-голяма от единица. Алтернативно условие е, реалната част на израза (3) да бъде 1, а имагинерната част – нула. Ако се използва инвертиращ усилвател, фазата на β(f) трябва да бъде 180°.

На практика преходният процес, който стартира с включването на захранването създава начален сигнал, чиято амплитуда нараства с преминаването му по затворената, чрез обратната връзка, верига. Във всяка реална схема са налице малки шумови сигнали.

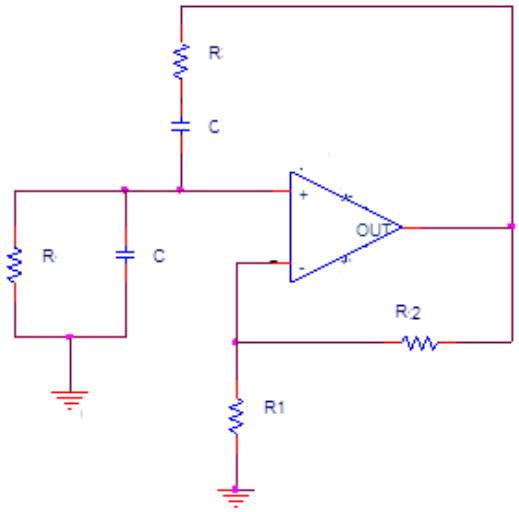
Пополярната RC схема, наречена мост на Вин, включена като положителна обратна връзка към операционен усилвател, който се доближава до идеален усилвател, и с резистивна отрицателна обратна връзка, за да се влияе на усилването на усилвателя при изпълнение на критерия (3), генерира стабилен синусоидален сигнал. Схемата е представена на фиг.3.

В курса по анализ и синтез на електронни схеми студентите са запознати с матричния метод на възловите потенциали. Този метод ще бъде приложен за примерната схема, а

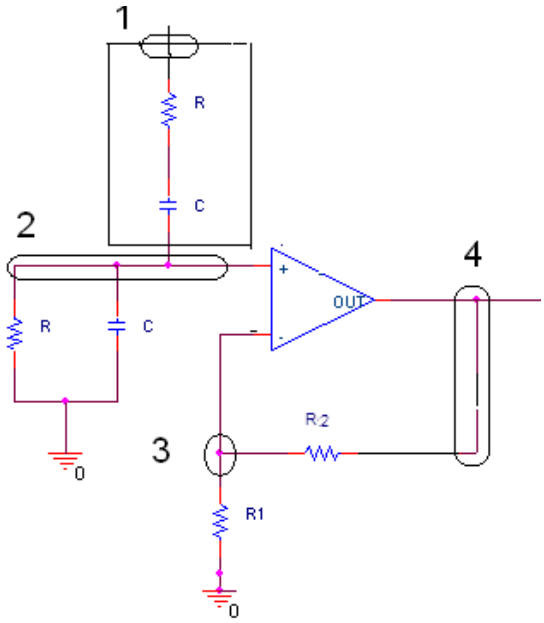
изчисленията, проверката и настройката с цел получаване на стабилен, неизкривен синусоидален сигнал, ще се реализират с програмите *Matlab* и *PSpice*.

1.2. Матричен анализ на схемата.

Определянето на предавателната функция на отворената верига на генераторната схема в символен вид, а след това и условията за възникване на устойчиви генерации на синусоидален сигнал е на база на променливотоковата еквиваленна схема, представена на фиг. 4. Описанието на схемата в матрица на проводимостите с по-малка размерност, [Y], е предпоставка за избор на една подсхема, в която са включени последователно свързаните елементи R и C .



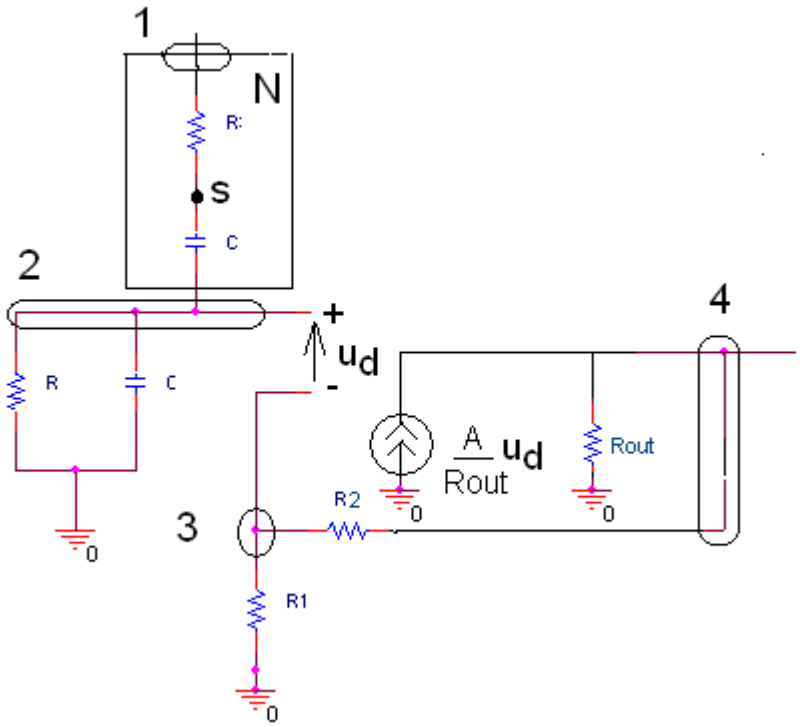
Фиг. 3. Генератор с мост на Вин



Фиг. 4. Еквивалентан схема по променлив ток за определяне на общото усилване на операционния усилвател и обратната връзка

В пълната еквивалентна схема, която е представена на фиг.5, операционният усилвател е заместен с идеален макромодел със зависим източник на ток, управляван от диференциалното му напрежение, където Rout е изходното съпротивление. Означени са номерата на възлите, а с номер ***s*** е означен вътрешният възел на подсхемата **N**. Матрицата на проводимостите се съставя по правилата на метода на подсхемите [8]. Тя е квадратна и има размерност, съответна на броя на възлите (без вътрешните възли на подсхемите). Отразяването на схемните елементи в нея се извършва отделно за клоните и подсхемите без зависими източници и отделно за зависимите източници. В първия случай в клетките на главния диагонал се записват собствените проводимости на клоните и на подсхемите, а в клетките извън главния диагонал се записват със знак ‘минус’ взаимните проводимости на двуполюсниците и със знак „плюс” взаимните обобщени проводимости на подсхемите. Всеки зависим източник се отразява в клетките, които имат индекс за ред, съответен на номерата на възлите на зависимия

ток и индекс за стълб, съответен на номерата на възлите на клона на управляващото напрежение. В тези клетки се записва управляващият параметър от израза за зависимия ток. Знакът пред него се определя след проверка на ориентацията на зависимисия ток спрямо възела съответен на индекса за ред и проверка на ориентацията на зависимото напрежение спрямо възела съответен на индекса за стълб. Ако в двата случая ориентацията е еднаква, то знакът е „минус”, а ако е противоположна, то знакът е „плюс”. Тези правила са приложени при съставянето на матрицата на проводимостите [Y], (4), за пълната еквивалентна схема от фиг.5.



Фиг. 5. Пълна еквивалентна схема по променлив ток за определяне на Aβ(f)

$$[Y]=\begin{array}{c} \\ 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{array}\begin{array}{c} \begin{array}{cccc} 1 & 2 & 3 & 4 \end{array} \\ \begin{bmatrix} Y_{11N} & Y_{12N} & 0 & 0 \\ Y_{21N} & Y_{22N}+\dfrac{1}{R}+pC & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dfrac{1}{R1}+\dfrac{1}{R2} & \dfrac{-1}{R2} \\ 0 & \dfrac{-A}{Rout} & \dfrac{1}{R2}+\dfrac{A}{Rout} & \dfrac{1}{R2}+\dfrac{1}{Rout} \end{bmatrix} \end{array} \qquad (4)$$

Предавателната фукция по напрежение на схемата при отворена верига, $K_{uo.в.}$ е:

$$K_{uo.б.} = \frac{\Delta_{14}}{\Delta_{11}} = \frac{Y_{21N}\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}\right)\frac{A}{R_{out}}}{\left(Y_{22N}+\frac{1}{R}+pC\right)\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}\right)\left(\frac{1}{R_2}+\frac{1}{R_{out}}\right)-\frac{1}{R_2}\left(Y_{22N}+\frac{1}{R}+pC\right)\left(\frac{1}{R_2}+\frac{A}{R_{out}}\right)} \quad (5)$$

$$\lim_{A\to\infty} K_{u\ o.b.} = \frac{-Y_{21N}\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}\right)\frac{A}{R_{out}}}{\frac{1}{R_2}\left(Y_{22N}+\frac{1}{R}+pC\right)\frac{A}{R_{out}}} = \frac{-Y_{21N}\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}\right)}{\frac{1}{R_2}\left(Y_{22N}+\frac{1}{R}+pC\right)} \quad (6)$$

С формулата за редукция на един вътрешен възел, се определя всяка от обобщените проводимости на подсхемата **N** в израза на предавателната функция по напрежение.
Тя има вида, представен с израза (7),

$$Y_{ij}' = Y_{ij} - \frac{Y_{is}Y_{sj}}{Y_{ss}} \quad (7)$$

Номерът на възела, който се редуцира е ***s***. Проводимостите във формулата са от матрицата на подсхемата **N**, в която се отчита и вътрешния възел ***s***. След заместване с техните символни стойности се получават обобщените проводимости във вид, позволяващ численото им пресмятане, както е представено в изразите по-долу.

$$Y_{21N}' = Y_{21} - \frac{Y_{2S}Y_{S1}}{Y_{SS}} = -\frac{(-pC)\left(-\frac{1}{R}\right)}{pC+\frac{1}{R}} = -\frac{pC}{pCR+1} \quad (8)$$

$$Y_{22N}' = Y_{22} - \frac{Y_{2S}Y_{S2}}{Y_{SS}} = pC - \frac{(-pC)(-pC)}{pC+\frac{1}{R}} = \frac{pC}{pCR+1} \quad (9)$$

Предвателната функция (6), след заместване на обобщените проводимости от изразите (8) и (9), е:

$$K_{uO.B.} = \frac{p\frac{1}{CR}\left(1+\frac{R_2}{R_1}\right)}{p^2+\frac{3p}{CR}+\frac{1}{C^2R^2}}, \quad (10)$$

В изразите по-горе p=j ω е честотната променлива.
Съгласно теорията за обраните връзки в схемите и условията за възникване на генерации, е необходимо да се осигурят условия в схемата за максимално усилване,

когато фазовата разлика е нула (положителна обратна връзка) [7], [9]. За да бъде контролирана големината на генерирания сигнал и нелинейните изкривявания след възникване на генерациите е необходимо да се контролира нарастването на амплитудата на сигнала, като подходящо се намали усилването.
Изискванията за възникване на генерации съгласно (3) е представено с израза (11).

$$K_{uO.B.} = \frac{p\frac{1}{CR}\left(1+\frac{R_2}{R_1}\right)}{p^2+\frac{3p}{CR}+\frac{1}{C^2R^2}} = 1; \quad j\omega\frac{1}{CR}\left(1+\frac{R_2}{R_1}\right) = -\omega^2 + j3\frac{\omega}{CR}+\frac{1}{C^2R^2} \qquad (11)$$

Изразът (11) се преобразува с цел отделяне на реалната и имагинерната част:

$$j\omega\frac{1}{CR}\left(1+\frac{R_2}{R_1}-3\right)+\omega^2-\frac{1}{C^2R^2}=0 \qquad (12)$$

Тъй като уравнението (12) е комплексно, за да бъде в сила, е необходимо по-отделно реалната и имагинерната му част да са приравнят на нула. Следователно за амплитудното и фазовото условие за генерации са в сила съответно условията (13) и (14).

$$1+\frac{R_2}{R_1}=3 \quad \text{- амплитудно условие} \qquad (13)$$

$$\omega=\frac{1}{CR} \quad \text{- честота на генерации} \qquad (14)$$

2. Ичислителен етап, оценка и настройка на проекта

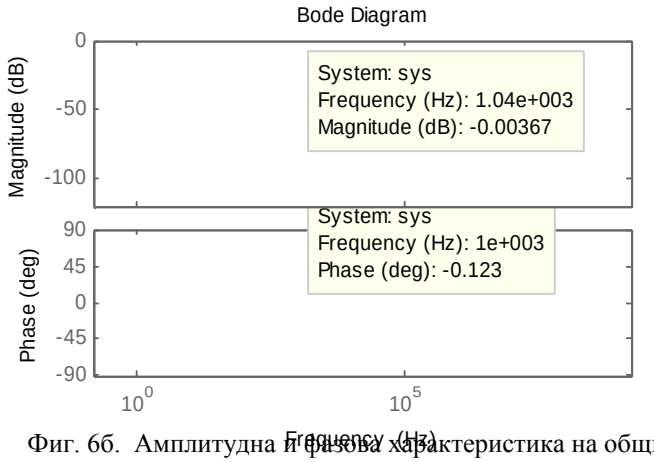
2.1.Приложение на *Matlab* за проверка на достоверността на теоретичната предава-телна функция.

Програмата Matlab е вид калкулатор, но в сравнение с конвенционалния, който може само да съхранява и използва реални числа, *Matlab* освен, че използва като основен тип данни матриците с недефинирана размерност, работи с променливи, които могат да бъдат и комплексни числа. *Matlab* разполага със стотици предварително дефинирани функции, чрез които могат да се създават кратки скриптове, но да се реализират сложни изчисления, които да имат и графично представяне. Колкото по-рано в обучението се включи използването на *Matlab*, толкова по - ефективно ще стане то. В настоящите учебни програми на студентите от специалността Електроника в ТУ Варна, изучаването на *Matlab* е включено в дисциплината Въведение в *Matlab* още в началото на обучението.
За конкретната схема на RC генератор е необходимо да се провери и потвърди валидността на изведената предавателна функция и на условията за устойчива генерация на сигнал, както и честотата на генерирания сигнал. В *Matlab* един от най-

бързите начини е използването на функцията *bode*. Тя изислява и изчертава честотните харакеристики на посочена дробно-рационална функция на кръговата честота.
Съгласно израза (14), ако е необходимо да се генерира сигнал с честота 1kHz и се избере съпротивление, удобно за практическа реализация, със стойност R=1кΩ, стойността на кондензатора се изчислява C = 159nF. Времеконстантата в този случай има стойност $t = CR$= 159μs. За изчислението на амплиудната и фазовата характеристика е създаден скрипт, който включва въвеждането на предавателната функция (10) чрез две матрици редове с имена *num* и *den*, в които са записани коефициентите пред степените на честотната променлива p=jω на полиномите в числителя и знаменателя. Чрез функцията *logspace* за променливта ω е реализирано логаритмично изменение на кръговата честотата в 1001 точки от 1Hz до 10GHz.
След изпълнението на функцията *bode,* чиито аргументи са матриците *num* и *den*, и честотата ω, се изчертават графиките на амплитудната и фазова характеристика на общия коефициент на усилване на операционния усилвател и на обратната връзка, реализирана с моста на Вин. Скриптът за *Matlab* и получените честотни характеристики са показани на фиг. 6 а и фиг. 6 б.

```
t=159e-6
num=[1/t*(1+2),0];
den=[1, 3/t, 1/t^2];
w=logspace(0,10,1001);
bode(num,den,w)
```

Фиг. 6а. Скрипт за изчисляване на честотните характеристики на RC генератора



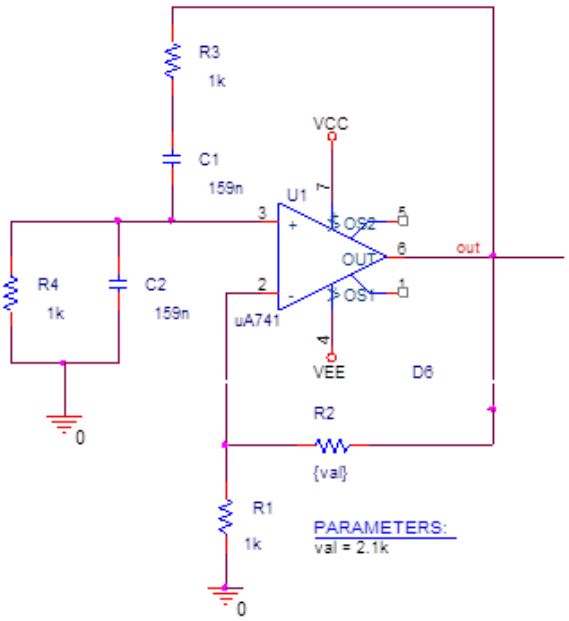
Фиг. 6б. Амплитудна и фазова характеристика на общия коефициент на усилване на операционния усилвател и моста на Вин

Сканираните точки на амплитудната характеристика показват, че при честотата на генерации амплитудното условие е изпълнено – стойността на амплитудата е 1, или 0dB, а стойността на фазата е 0 градуса. Малките отклонения от тези стойности се дължат на стъпката, с която се движи курсора по графиките.

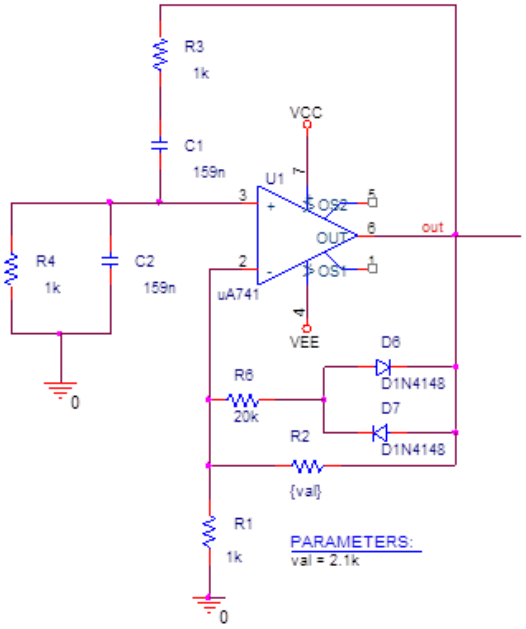
2.2.Приложение на PSpice за изследване на схемата на RC генератора и настройка на амплитудата на сигнала

Успешното проектиране на аналогови устройства се базира на комбинация от умения за извършване на анализ на схемите и интуитивно разбиране за тях на база на множество извършени от проектанта изследвания и експерименти, и натрупания опит. Тъй като виртуалните експерименти на различни схеми са много по-лесно реализируеми, в сравнение с реалните експерименти, симулаторът *PSpice* помага на студентите да развият интуитивно разбиране за схемите за много по-кратко време. *PSpice* е мощно

средство за изучаване на трудни, специфични за електрониката дисциплини като теория на веригите, обработка на аналогови и цифрови сигнали, телекомуникации и др. [3].
PSpice е изключително удобно средство за изследване влиянието на схемни параметри върху схемни характеристики, изследване на шумовете в схемата, оптимизация на схемни харакеристики, изседване на температурни влияния и др.
Предимствата от приложението на *PSpice* са още повече, когато програмата се интегрира към лабораторен експеримент и студентите сравняват измерени и симулирани характери-стики. Различията в резултатите са полезни при дискусии и в двата аспекта на грешки; на експеримента и на необходимост от промени в модела за по-добра адекватност [2].
За конкретното приложение на PSpice при проектирането на RC генератори е извършен честотен анализ за схемата от фиг.7а, когато е прекъсната връзката на R3 с изхода на ОУ, а към R3 е включен AC генератор на сигнал с постоянна амплитуда и променлива честота. Най-напред се демонстрира, че честотните характеристики на операционния усилвател и честотно заявсимата обратна връзка при прекъсната обратна връзка (отворена верига на обраната връзка) съответстват на теоретичната предавателната функция (10) и условията за възникване на генерации и честотата на генерации (13) и (14). На два плота на фиг. 8 са представени съответно симулираните амплитудна характеристика (V(OUT)/ V(IN)) и фазовата характеристика. Възелът, който свързва R3 с AC генератора е именуван IN. При честотата 1KHz, е постигнато амплитудното условие за усилване равно на 1 и за фазова разлика равна на нула.



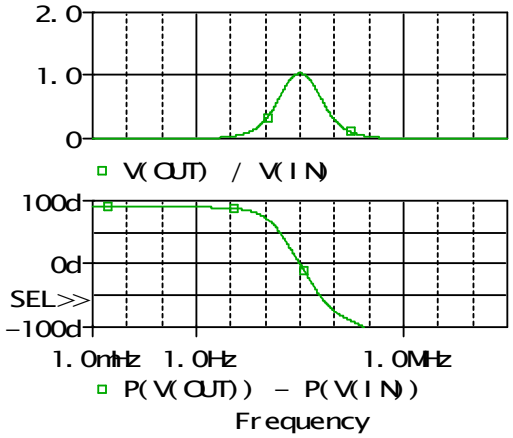
Фиг. 7а. Схема на RC генератора с честота на генерациите 1kHz



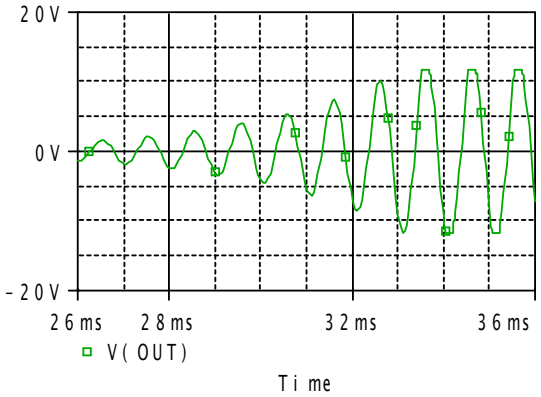
Фиг. 7б. Подобрена схема на RC генератора с честота на генерациите 1kHz

След това с времеви анализ за схемата от фиг.7а се потвърждава генериране на сигнал с честота 1KHz. При този анализ е необходимо да се избере опцията „ Skip the initial transient bias point calculation“ (без изчисляване на начална работна точка). Работата с

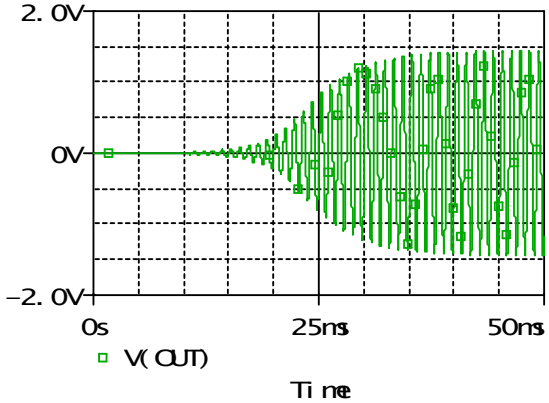
модели на реален операционен усилвател и моделирането на наличието на токове на несиметрия се явява начален сигнал, който се усилва само при честотата на генерациите. Ако не се предвиди в схемата начин за ограничаване на нарастването на амплитудата, то генерираният в изхода сигнал достига напреженията на насищане на усилвателя и изкривяванията са големи. В този случай формата на генерирания сигнал е представена на фиг. 9. Затова са въведени допълнителните елементи *D6* и *D7* в паралел и последователно на тях съпротивлението *R6*. Групата от тези елементи е в паралел на съпротивлението *R2* в обратната връзка. Подобрената схема на генератора е показана на фиг. 7б. При малък сигнал двата диода са запушени и коефициентът на усилване е малко над единица - необходимото условие за стратиране на симулацията. При достигане ниво на сигнала в изхода, което отпушва единия от двата диода, коефициентът на усилване пада малко под единица и амплитудата на сигнала се стабилизира без да има изкривявания в сигнала, както е показано на фиг. 10а и по-детайлно на фиг. 10б.



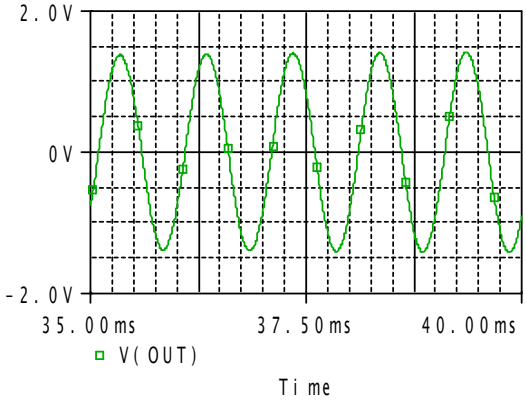
Фиг. 8. Амплитудна и фазова характеристика на RC генератора –отворена верига



Фиг. 9. Форма на генерирания сигнал без ограничение за големината на амплитудата



Фиг.10. а. Форма на генерирания сигнал с отразяване на преходния процес



Фиг. 10. б. Форма на генерирания сигнал без изкривявания

С помоща на симулатора и толерансен анализ може да се оцени влиянието на точността на резисторите. С параметричен анализ лесно се настройва големината на амплитудата, влиянието на температурата и др.

Заключение

В статията е представен един иновативен подход за изучаване на аналогови схеми с помоща на универсални програми *Matlab* и *PSpice*. Обединен е концептуалният подход в изучаването на RC генераторните схеми с изчислителен подход в *Matlab* и симулационен подход с *PSpice*. Разгледан е RC генератор с мост на Вин, като е изведено условието за генерации по критерия на Barkhausen с приложение на обобщения метод на възловите потенциали за аналогови електронни схеми. За конкретна честота на генерации е показан скрипт за Matlab, чрез който са потвърдени теоретичните резултати. Описан е начинът и са представени резултатите от симулационна настройка за стабилизацията на амплитудата на генератора с *PSpice*. Даден е пример за обучението на студентите чрез решаване с помоща на компютър на примерен проект в заключителения етап на тема от изучавана дисциплина. Разработеният подход е с цел повишаване на качеството на обучението и нивото на разбиране от студентите по дисциплината „Аналогова схемотехника“. Статията има приложен и методологичен характер. Този подход може да бъде приложен в разглеждането на всички основни теми по аналогова електроника.

References

[1] Pota, H., Computer–Aided Analog Electronic Teaching, IEEE Transactions on Education, vol. 40, No.1, February, 1997, pp 22 -35.

[2] Lamey, R., The illustrated guide to PSPICE, Delmar Publishers INC, NY, 1995, ISBN-0-8273-6524-1

[3] Tobin, P., PSpice for Circuit Theory and Electronic Devices, Morgan &Claypool Publishers, 2007, ebook ISBN 9781598291575

[4] Tuinenga. P., SPICE, A Guide to Circuit Simulation an Analysis Using PSpice, Prentice Hall, NJ ed. 1988, ISBN 0138346070

[5] PSpice® User’s Guide, Product Version 10.5, June 2005

[6] Attia, J.. PSPICE and MATLAB for Electronics: An Integrated Approach, Sd. Edition. CRC Press, June 2010 , ISBN-10: 1420086588

[7] Hambley A., Electronics A Top-Down Approach to Computer-Aided Circuit Design, Prentice Hall, 1994, ISBN 0-02349335-6

[8] Боянов Й., Шойкова Е., Теория на електронните схеми, ДИ „Техника”, София, 1989.

[9] Carter B., Mancini R., Op Amps for everyone, 3d ed., Elsevier, 2009, ISBN 978-1-85617-505-0